



УДК 550.380; 551.508; 551.501



Памяти Романа Юрьевича Юрика

ГРАНИЦЫ ТРУБКИ НАГРЕВА ИОНОСФЕРЫ НАД СТЕНДАМИ EISCAT И СУРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ ГНСС

Тертышников А.В.¹, Юрик Р.Ю.

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Представлены результаты эксперимента 2018 г. по радиопросвечиванию сигналами КА ГНСС границ трубки нагрева ионосферы над нагревным комплексом EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия). По результатам эксперимента подтвердились достаточно резкие градиенты ионосферной задержки сигналов КА ГНСС в высокоширотной ионосфере на границах трубки нагрева ионосферы над стендом, как и в 2009 г. в среднеширотной ионосфере над нагревным стендом Сура (Васильсурск, Россия).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАГРЕВ, ИОНОСФЕРА, СТЕНД, EISCAT, СУРА, ИОНОСФЕРНЫЕ ЗАДЕРЖКИ, ГНСС.

DOI 10.5425/2304-7380_2022_35_

<https://elibrary.ru/gjqvxd>

1. ВВЕДЕНИЕ

Нагревные стенды являются мощным диагностическим инструментом для исследования ионосферы. В настоящее время эксперименты по модификации ионосферы проводятся в основном на стенде "Сура" (56,15° с.ш., 46,1° в.д., L = 2,8, I = 72°, Васильсурск, Россия) и ионосферном нагревном

Электронная почта авторов для переписки:

Тертышников Александр Васильевич, e-mail: atert@mail.ru



Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

<https://elibrary.ru/gjqvxd>

комплексе EISCAT/Heating (69,6° с.ш., 19,2° в.д., $L = 6,2$, $I = 78^\circ$, Тромсё, Норвегия). Для диагностики эффектов нагрева ионосферы активно используется метод радиопросвечивания сигналами Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1-6].

Во 2 декаде марта 2009 г. на стенде "Сура" проводился эксперимент по апробации технологии мониторинга возмущений ионосферы на основе радиопросвечивания сигналами спутников GPS/ГЛОНАСС в условиях воздействия на ионосферу мощного коротковолнового излучения [7-9]. Планировалось получить оценки вариаций фазы сигналов навигационных КА (НКА) GPS/ГЛОНАСС на границах и под областью искусственно возмущенной ионосферы. Организатором эксперимента по нагреву ионосферы был профессор В.Л. Фролов (ФГНУ НИРФИ, Н. Новгород).

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭФФЕКТА ГРАНИЦ ТРУБКИ НАГРЕВА НАД СТЕНДОМ «СУРА»

В основном режиме работы стенда «Сура» в период проведения эксперимента использовалось излучение волны О-поляризации на частоте 4,3 МГц под углом 12° от вертикали на юг в плоскости геомагнитного меридиана. В режиме работы производились периодические выключения стенда. Аналогичные режимы используются в экспериментах на американском нагревном стенде HAARP.

Диаграмма направленности ЭМИ стенда «Сура» формировалась тремя модулями стенда и имела «карандашную» форму с углом раскрытия $\sim 12^\circ$ по уровню половинной мощности и $\sim 20^\circ$ по уровню $0.1 P_0$, который соответствует эффективной мощности излучения, достаточно превышающей порог генерации тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости $P_{\text{пор}} \approx 1$ МВт [9]. Отвечающая ей область засветки на высоте 250 км оценивалась размерами в 50 и 90 км по уровню мощности 0,5 и 0,1, соответственно. Расстояние от точки измерения до проекции на земную поверхность области воздействия составляло около 100 км, а площадь нагреваемого «пятна» в ионосфере на длительной стадии его расплывания зависит от возможностей обнаружения возмущений ионосферы. При этом, в зависимости от когерентности модулей стенда можно было ожидать сложную структуру потенциальных границ трубки нагрева. Вынос нагретой плазмы в трубке нагрева обеспечивает обеднение плотности плазмы и формирование условий для восстановления плотности, в том числе за счет притока извне. Для нагрева ионосферы использовались регулярные 3 минутные коротковолновые импульсы с мощностью 80 МВт.

Несколько навигационных приемников сигналов ГНСС для радиопросвечивания ионосферы располагались рядом с нагревным стендом. При первичной обработке сигналов ГНСС выяснилось, что работа стенда не влияет на стабильность работы приемников. Измерения выполнялись при низком уровне геомагнитной активности, погода за весь период экспериментов была ясная, характерная для периода весеннего равноденствия. На основе полученной информации рассчитывалось полное электронное содержание (ПЭС или ТЕС – total electron contents).

Для диагностики потенциальных границ трубки нагрева ионосферы над стендом проводился выбор трассы КА ГНСС над зоной нагрева, исходя из видимого созвездия КА. По выбранным НКА проводилась обработка принятых сигналов с учетом пространственно-временной привязки орбит. Предполагалось также, что в силовой трубке магнитного поля, опирающейся на область возмущенной ионосферы, меняются условия для прохождения сигналов НКА, а через область нагрева ионосферы снизу создаются условия для проникновения техногенных ЭМИ в верхнюю атмосферу (эффект «пылесоса»).

Анализ состояния ионосферы проводился по разности двухчастотных фазовых измерений, что пропорционально концентрации заряженных частиц в ионосфере. Особенностью обработки малых вариаций сигналов НКА в эксперименте было использование метода спектрального анализа [10]. Это позволило выявить эффект аномального изменения спектра принимаемых сигналов над зоной возмущенной области ионосферы с небольшим увеличением мощности на периоде 3 минуты и снижением на мощности периода 6 минут.

За 20 минут вектор на НКА пересекает на высоте 300 км зону шириной до 60 км. В ней общее снижение мощности вариаций сигналов обусловлено обеднением ионосферной плазмы над зоной нагрева. По секундным данным в спектрограммах был обнаружен всплеск мощности вариаций над зоной стенда и изменения спектра мощности, которые могут соответствовать границам возмущенной области ионосферы. Также были отмечены периодические возмущения спектра мощности при подлете НКА к стенду. Границы силовой трубки магнитного поля над областью нагрева по трассе НКА — приемник на полигоне стенда «Сура» были похожи на «гофрированные».

Эффект изменения спектра мощности вариаций сигналов НКА GPS над границами и в центре области ионосферы над работающим нагревным стендом показал и возможность диагностики дактов плотности в трубке магнитного поля над стендом в верхней ионосфере. Этот эффект и планировалось выявить в высокоширотной ионосфере над стендом EISCAT/Heating в 2018 г.

По критерию уменьшения плотности плазмы на величину 0.2 – 0.4 ТЕС можно оценить примерную ширину области обеднения, опирающейся на зону нагрева, считая, что ее размер вдоль H_0 составляет ~ 50 км. Результаты расчетов показывают, что в этом случае относительное изменение плотности плазмы составляет примерно 15–20%, что согласуется с данными томографических измерений [4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НАД СТЕНДОМ EISCAT/HEATING В 2018 Г.

Результаты эксперимента 2009 г. по значительным градиентам плотности ионосферной плазмы на границах трубки нагрева были подтверждены в [15] независимыми от МГУ измерениями при нагреве ионосферы на стенде EISCAT/Heating вблизи г. Тромсё (Норвегия). Очередной эксперимент на этом стенде, подтверждающий проявление границ трубки нагрева, удалось провести 8-18 октября 2018 г.

Стенд EISCAT/Heating состоит из 12 передатчиков по 120 кВт каждый. В качестве антенны для каждого из передатчиков используется ряд из 12 широкополосных диполей (всего 144, как и на «Суре»). Весь диапазон перекрывается двумя антенными решетками 2.8– 5.7 МГц и 5.3–8.2 МГц [5].

Во время эксперимента 12.09.2018 г. в период с 10:12 UT до 11:34 UT стенд работал в режиме сканирования по частоте и по углу наклона диаграммы направленности излучающей антенны. Нагрев велся в режиме 2 минуты излучение и 2 минуты пауза. В течение 2 минут излучения частота накачки менялась каждые 5 секунд на 5 кГц в интервале частот от 4.01 МГц до 4.12 МГц. Изменение направления диаграммы излучающей антенны менялось на 3° через каждые 4 минуты от направления в магнитный зенит (12° к югу) до географического зенита (0°) после чего направление диаграммы направленности отклонялось на 15° к югу.

На рисунке 1 показана проекция траектории пролета спутника ГЛОНАСС R21 в районе установки EISCAT/Heating 12.09.2018 г.

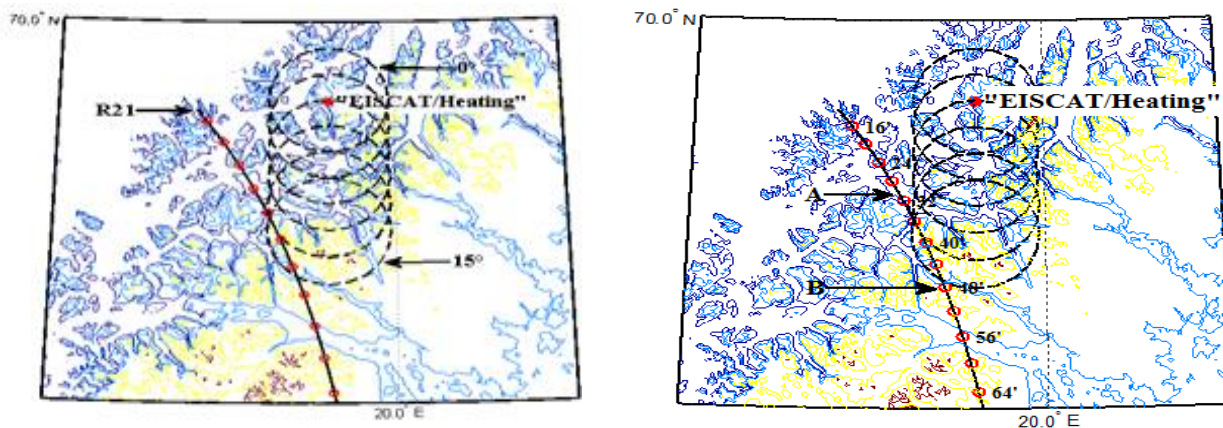


Рис. 1. Проекция траектории пролета КА R21 вблизи нагревного стенда EISCAT 12.09.2018 г. (рисунки Р.Ю. Юрика)

Штриховыми окружностями показаны области нагрева по уровню мощности -3 дБ при разных углах наклона диаграммы направленности излучающей антенны нагревного стенда во время эксперимента (от направления в географический зенит 0°, до 15° к югу).

Особенностью регистрируемых ионосферных задержек по траектории движения R21 на границах зоны нагрева являются повышенные градиенты ПЭС, которые были получены по фазовым измерениям 12.10.2018 с 09:20 до 12:27. Для выделения быстрых вариаций полного электронного содержания медленная составляющая, связанная с геометрическим фактором и фоновым полным содержанием вычиталась путем удаления тренда, аппроксимированного полиномом 5-го порядка.

На верхнем графике рис. 2 черными вертикальными стрелками отмечены границы области нагрева по широте, а на втором графике эти области указаны по долготе. Возвышение спутников ГЛОНАСС над горизонтом достигает 70 градусов. Это означает, что на широте Тромсё трасса «спутник-Тромсё» пересекает область нагрева близко к локальной вертикали почти вдоль локальной геомагнитной силовой линии «Тромсё». Это позволило по данным ионосферных задержек определить примерные границы (по широте и долготе) области нагрева, соответствующие экспериментам на нагревном стенде Сура.

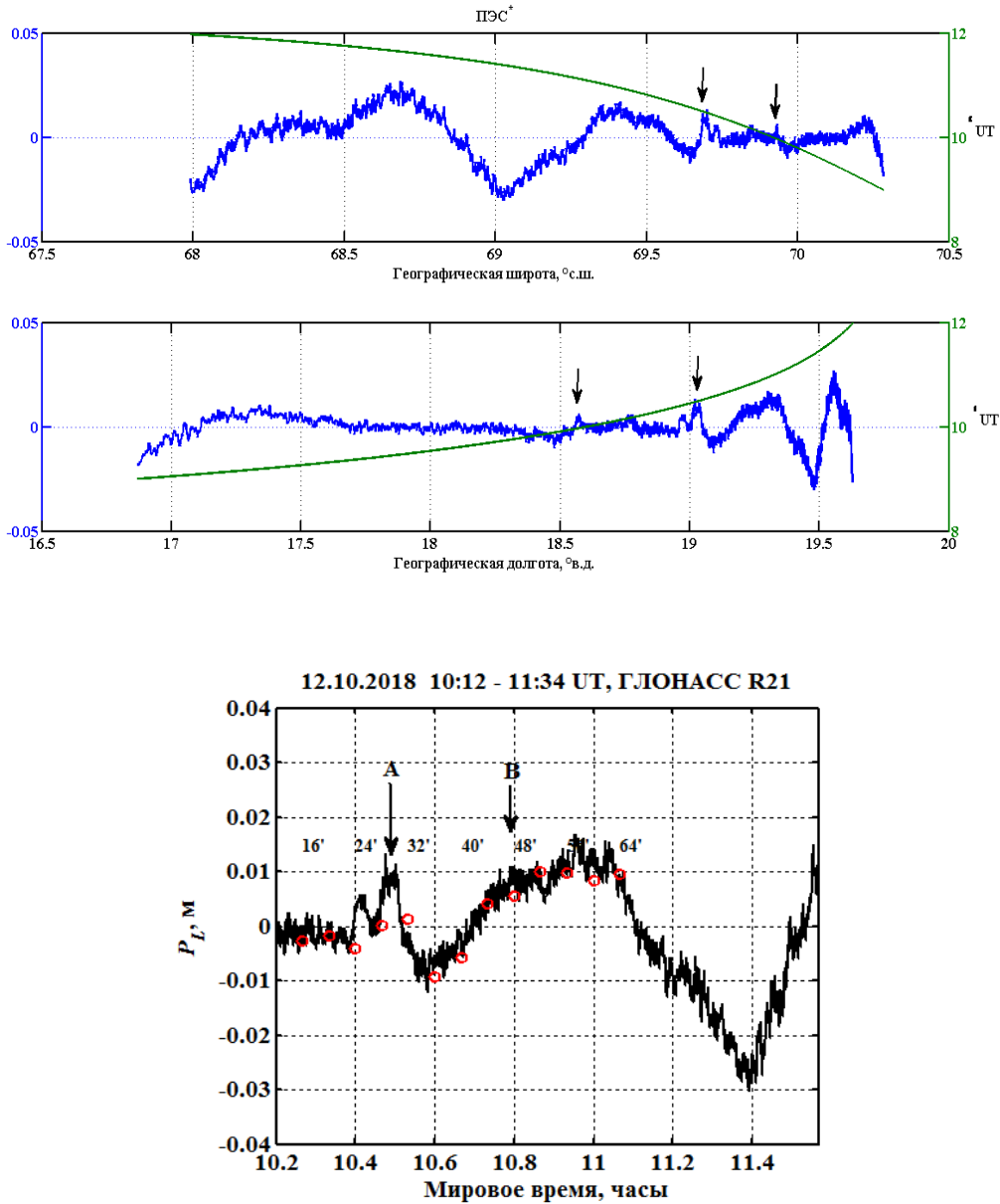


Рис. 2. Вариации ПЭС по данным ионосферных задержек сигналов КА R21 в метрах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным экспериментов на нагревном стенде Сура в 2009г. и на EISCAT в 2018 г. отмечено увеличение градиентов ионосферных задержек на границах области нагрева, что свидетельствует о достаточно резких границах области (трубки) нагрева. Эффекты в среднеширотной и высокоширотной ионосфере оказались схожими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информатика и космос. 2010. Т. 1. С. 100-105.
2. Тертышников А.В., Пулинец С.А. «Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации»/ Заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013. Прекратил действия по неуплате пошлины.
3. Тертышников А.В. и др. Патент на изобретение № 2693842 «Способ зондирования ионосферы и тропосферы» / Заявка № 2018127892 от 30.06.2018. Оpubл. 05.07.2019. Патентообладатель ФГБУ ИПГ.
4. Тертышников А.В. Патент на изобретение «Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли». Заявка № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г.
5. Тертышников А.В., Фролов В.Л. и др. Патент № 2560525 «Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений» / Заявка № 2014125712. 22.07.2015 г. Срок действия до 25 июня 2034 г. Патентообладатель ФГБУ ИПГ.
6. Тертышников А.В. и др. Патент на изобретение № 2017111411 «Способ зондирования плазменного слоя геомагнитного хвоста и ионосферы Земли» / 04.04.2017. Дата регистрации: 06.06.2018. Опубликовано: 06.06.2018, Бюл. № 16. Патентообладатель ФГБУН ИРЭ РАН Фрязинский филиал.
7. Тертышников А.В., Скрипачев В.О., Большаков В.О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. №3. С. 110-114.
8. Тертышников А.В., Суровцева И.В., Фролов В.Л., Смирнов В.М. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - Москва: ИКИ РАН, 2010. Т. 3. С. 115-119.
9. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2017. 468 с
10. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 278 с.
11. Тертышников А.В. Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=48/>).
12. Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В., Давиденко Д.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // Гелиогеофизические исследования, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=162>. Выпуск 5, 2013, С. 65–73.
13. Тертышников, А.В. Вариации оценок одночастотного позиционирования по сигналам ГНСС GPS на стенде «Сура» / А.В. Тертышников, Я.В. Глухов, А.В. Алексеева // Труды Международной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн - ИРЭМВ-2015» - Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 427- 429.
14. Смирнов В.М. Радиофизические методы исследований и мониторинга ионосферы Земли/Плазменная гелиофизика/Под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, т. 2. С. 350-367.
15. Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Ритвельд М.Т., Черняков С.М., Швец М.В. Изменение высокоширотной ионосферы при нагреве мощной коротковолновой радиоволновой установки EISCAT/Heating по данным сигналов спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 170-181. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-170-181.

**THE BOUNDARIES OF THE IONOSPHERE HEATING TUBE ABOVE THE EISCAT AND SURA STANDS
BASED ON THE RESULTS OF RADIO ILLUMINATION BY GNSS SIGNALS**

Tertyshnikov A.V., [Yurik R. Yu.](#)

The results of a 2018 experiment on radio illumination by GNSS spacecraft signals of the boundaries of the ionosphere heating tube over the EISCAT/Heating heating complex (Tromso, Norway) are presented.

According to the results of the experiment, rather sharp gradients of the ionospheric delay of the GNSS spacecraft signals in the high-latitude ionosphere at the boundaries of the ionosphere heating tube above the stand were confirmed, as in 2009 in the mid-latitude ionosphere above the Sura heating stand (Vasilsursk, Russia).

KEYWORDS: HEATING, IONOSPHERE, STAND, EISCAT, SURA, IONOSPHERIC DELAYS, GNSS